

УДК 622.831:620.179.17

**Скипочка С.И.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Сергиенко В.Н.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

## **АППАРАТУРА «ШВК-1» ДЛЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МАССИВА**

**Скіпочка С.І.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Сергієнко В.М.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України)

## **АПАРАТУРА «ШВК-1» ДЛЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ МАСИВУ**

**Skipochka S.I.**, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Sergienko V.N.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **THE «ШВК-1» EQUIPMENT FOR VIBRO-ACOUSTIC CONTROL OF THE CONDITION OF THE MASSIF**

**Аннотация.** Объект исследований – виброакустический метод горной геофизики, традиционно используемый для выявления заколов и расслоений в приконтурной зоне массива. Цель работы – разработка аппаратуры, расширяющей возможности метода и повышающей оперативность контроля. Информативные параметры оценки состояния массива горных пород, лежащие в основе разработанной аппаратуры – характеристики затухания его собственных колебаний. Возбуждение колебаний осуществляют одиночным ударом. В состав аппаратуры входят ударник, датчик вибрации с кабелем и электронный блок. Результаты отображаются на трехразрядном светодиодном индикаторе. С целью повышения электромагнитной устойчивости датчик вибрации выполнен активным. Для снижения энергопотребления энергоемкие узлы автоматически подключаются на короткое время. Конструкция всех комплектующих аппаратуры позволяет выполнять обследования в труднодоступных местах. Экспериментальный образец аппаратуры прошел апробацию на двух шахтах.

**Ключевые слова:** виброакустический контроль, массив горных пород, заколы, расслоения, аппаратура.

Виброакустический контроль относится к группе методов неразрушающего акустического контроля, который широко применяется в различных областях мировой науки и техники [1-5].

В Украине ведущей организацией по разработке и использованию виброакустического метода для решения задач горного производства является ИГТМ НАН Украины [6-9]. Специалистами этого института развиваются три направления реализации виброакустического метода:

- спектральный анализ пакета свободных колебаний возбужденного ударом участка массива;

- определение интегральных энергетических характеристик пакета свободных колебаний;
- определение одной или нескольких характеристик затухания колебательного процесса.

Средства контроля, реализованные в рамках первого направления, - наиболее информативны. К их недостаткам следует отнести сложность калибровки, а также пониженную производительность контроля, связанную с регистрацией спектрограммы.

Второе направление дает возможность создать портативные средства контроля с регистрацией энергетического параметра колебаний в цифровой форме. Однако при этом необходимо обеспечить повышенную стабильность силы удара либо измерять ее величину для последующей автоматической корректировки показаний.

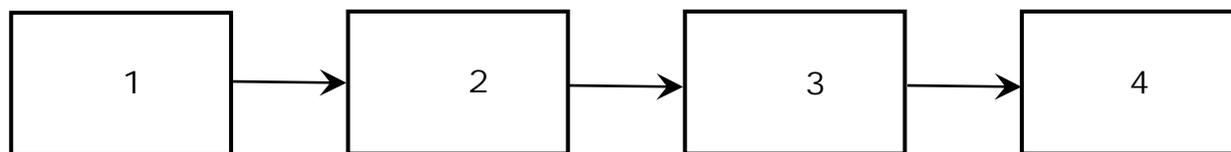
Новая разработка ШВК-1 (шахтный виброакустический контроль) развивает третье направление. Она опирается на результаты, полученные при опыте эксплуатации ранее созданных с участием авторов индикаторных средств контроля – ДВШ и ДИКОН [8], предназначенных для работы в среде, не опасной по газу и пыли. В данных разработках информативным параметром служит количество свободных колебаний на основной частоте, уровень которых превышает заданное пороговое значение. Стабилизация силы удара осуществляется путем использования механического ударника специальной конструкции. Достоинствами данного направления являются простая схемная реализация средств и высокая производительность выполнения работ. Глубина выявления скрытых расслоений в массиве – до 1,2 м. К недостаткам указанных средств контроля относятся:

- невозможность выполнения измерений в сильных электромагнитных полях низкой частоты;
- ограниченные возможности цифрового табло, затрудняющие выполнение контроля при широком изменении диапазона освещенности;
- сложность работы на участках с ограниченной свободой перемещения оператора.

Разработка ШВК-1 позволила исключить или в значительной степени уменьшить проявление перечисленных выше недостатков. В наибольшей степени ее преимущества проявляются при обследовании выработок большой высоты.

В качестве первичного преобразователя механической вибрации в аналоговый электрический сигнал традиционно используют сейсмоприемники либо пьезокерамику. Сейсмоприемники имеют более высокую чувствительность и низкое выходное сопротивление, что обеспечивает высокое отношение полезного сигнала к шумам и помехам. В то же время они отличаются невысокой надежностью к механическим воздействиям и требуют определенной пространственной ориентации. Датчики, выполненные на основе пьезокерамики, могут работать при произвольной их ориентации, выдерживают значительные виброускорения без изменения своих характеристик. Однако высокое выходное

сопротивление пьезокерамики требует качественного экранирования датчика и соединительного кабеля, соединяющего его с основным электронным блоком. Но и в этом случае чувствительность лимитируется не уровнем шумов входного усилителя сигнала, а амплитудой наводок переменного тока промышленной частоты. Проблема выбора между чувствительностью и помехоустойчивостью в данной разработке решена путем использования активного датчика, структурно-функциональная схема которого представлена на рис. 1.



1 – первичный преобразователь; 2 – первый буферный усилитель;  
3 – заграждающий фильтр; 4 – второй буферный усилитель

Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема датчика

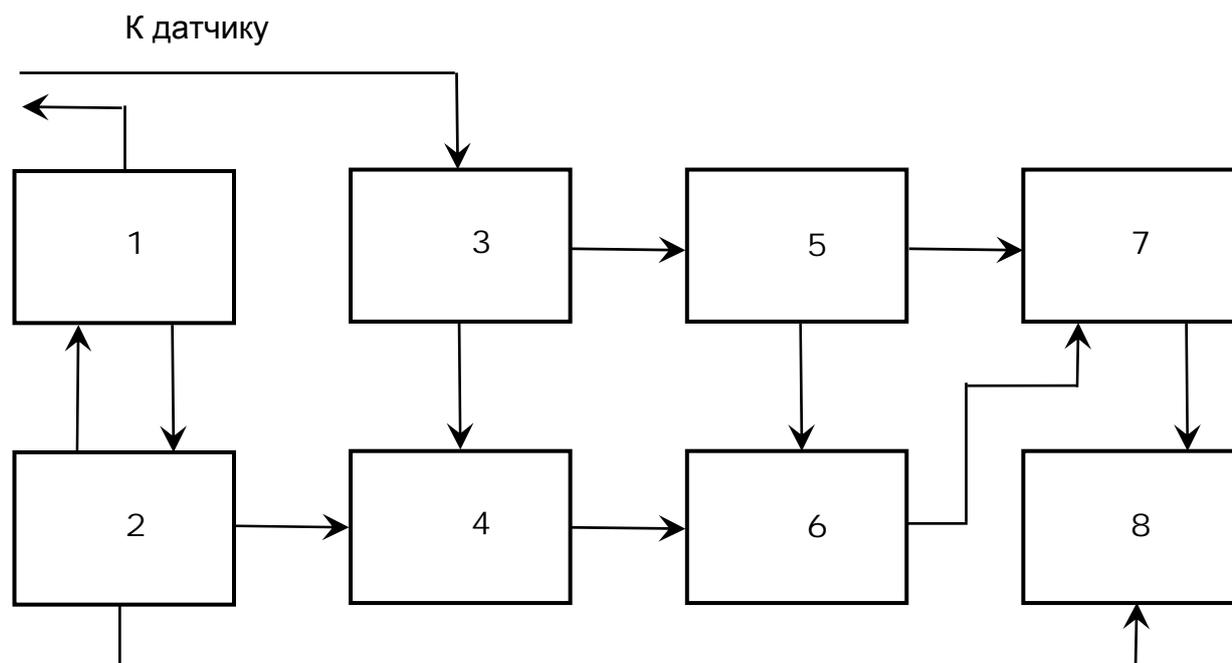
В качестве первичного преобразователя использована дискообразная керамика ЦТС-21 с основной резонансной частотой около 40 кГц. В низкочастотной области (до 3 кГц) керамика не имеет четко выраженных резонансов. Основная задача первого буферного усилителя 2 – трансформация высокого входного сопротивления в низкое выходное. Обязательным требованием является низкий уровень собственных шумов усилителя. Коэффициент усиления по напряжению небольшой – несколько единиц. Заграждающий фильтр 3 выполнен в виде двойного Т-образного моста с настройкой на 50 Гц. Для удовлетворительной работы заграждающего фильтра второй буферный усилитель 4 должен иметь высокое входное сопротивление. Выходное сопротивление усилителя 4 низкое. Повышенных требований к уровню собственных шумов не предъявляется, однако коэффициент усиления по напряжению значительно выше, чем для первого буферного усилителя. Питание усилителей – однополярное. Указанный комплекс свойств позволяет использовать для подключения датчика к основному электронному блоку неэкранированный трехжильный кабель, что обеспечивает его повышенную гибкость и надежность при многократных деформациях.

Выходной уровень сигнала датчика составляет десятые доли вольта. Этого недостаточно для уверенной цифровой обработки сигнала. Поэтому в основном электронном блоке сигнал дополнительно усиливается, превращается в последовательность прямоугольных импульсов, над которыми выполняются операции логического характера.

Структурно-функциональная схема основного электронного блока индикатора представлена на рис. 2.

Начальное напряжение батареи питания составляет 9 В. Допустимо его снижение до 7,5 В. Блок питания 1 выдает стабилизированное напряжение  $\pm 2,5$  В для питания операционных усилителей, а также 3,0 В для питания сегментов

светодиодных индикаторов. Блок контроля напряжения 2 служит для формирования трехпозиционного цифрового кода уровня напряжения батареи и автоматического выключения индикатора при его снижении до критического значения. Конечный усилитель 3 усиливает выходной сигнал датчика до величины 1-2 В. Первое пороговое устройство 4 срабатывает при достижении аналоговым сигналом высокого уровня. Для срабатывания второго порогового устройства 5 необходим уровень значительно меньший, но заведомо превышающий уровень шумов.



1 – блок питания; 2 – блок контроля напряжения; 3 – конечный усилитель;  
4 – первое пороговое устройство; 5 – второе пороговое устройства;  
6 – формирователь цикла; 7 – счетчик; 8 – цифровой индикатор

Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема электронного блока виброакустического индикатора ШВК-1

Формирователь цикла 7 запускается по переднему фронту импульса с выхода первого порогового устройства и обеспечивает последовательное формирование двух временных интервалов: 0,5 с и 4 с. Во время первого из них на счетчик 7 поступают импульсы с выхода второго порогового устройства. Их количество равно количеству свободных колебаний, превышающих уровень срабатывания узла 5. В течение этого периода индикация отсутствует. По окончании первого интервала блокируется работа счетчика 7 и в течение 4 с осуществляется индикация состояния счетчика. По истечении второго интервала происходит сброс счетчика 7 на нуль и прекращение индикации результатов. В режиме ожидания осуществляется символьная индикация состояния батареи по количеству десятичных точек:

а) три точки – батарея заряжена полностью;

- б) две точки – батарея работоспособна еще длительное время;
- в) одна точка – ресурс батареи заканчивается.

При отсутствии точек – напряжение батареи достигло минимального значения, при котором следует автоматическое отключение схемы от источника питания.

Для цифрового табло выбраны современные светодиодные индикаторы достаточно большого размера (высота 14 мм) с повышенной светоотдачей. Уменьшение энергопотребления осуществляется следующими схемотехническими приемами:

- гашением неиспользуемых разрядов при индикации показаний;
- минимально необходимым временным промежутком индикации, по истечении которого происходит гашение разрядов и переход в режим отображения состояния батареи в виде десятичных точек;
- питанием сегментов светодиодных индикаторов от отдельного импульсного понижающего стабилизатора
- автоматическим выключением прибора при достижении нижнего порога допустимого напряжения батареи.

Внешний вид основного электронного блока представлен на рис. 3.



Рисунок 3 – Внешний вид основного электронного блока виброакустического индикатора ШВК-1

Основные технические характеристики индикатора ШВК-1:

- напряжение питания, В – 7,5-9,0;
- максимальный потребляемый ток, мА – 200;
- диапазон подсчета количества колебаний – 0-999;
- длительность цикла измерения, с – 4,5;
- габариты, электронного блока, мм – 170x155x50;
- масса, электронного блока, кг – 0,8.

Апробация виброакустического индикатора ШВК-1 выполнялась в условиях Артемовской гипсовой шахты и железорудной шахты «Новая» ООО «Восток-Руда». Несмотря на различные горно-геологические условия и свойства пород контролируемого массива в обоих случаях уверенно выявлялись участки расслоений мощностью до 0,8-1,0 м по фактору увеличения продолжительности затухающего колебательного процесса. Вместе с тем, необходимо отметить, что критерии оценки состояния участка массива должны быть индивидуальными для условий конкретного месторождения и определяться на тарифовочном полигоне с заранее известными характеристиками расслоений.

Методика обследования участка кровли выработки в условиях шахты «Новая» иллюстрируется рис. 4.



Рисунок 4 – Виброакустическая диагностика кровли незакрепленной капитальной выработки железорудной шахты

Аппаратура ШВК-1 ориентирована преимущественно на выполнение работ по оценке состояния контура выработок в шахтах, не опасных по газу и пыли. Однако она может быть использована и для неразрушающего контроля крупногабаритных конструкций из бетона или железобетона.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков, А. Ю. Об эквивалентных параметрах многослойных конструкций применительно к оптимизации виброакустического метода контроля / А. Ю. Бауков, А. А. Звонкина // Горный информационно-аналитический бюллетень / МГУ. – М., 2009. – № 9. – С. 257-263.
2. Пустовойтова, Н. А. Повышение информативности резонансно-акустического метода опреде-

ления свойств массива горных пород / Н. А. Пустовойтова, В. Л. Шкуратник // Горный информационно-аналитический бюллетень / МГГУ. – М., 2008. – № 6. – С. 107-111.

3. Шашенко, А. Н. Математическая модель огибающей виброакустического зондирующего сигнала неоднородного породного массива / А. Н. Шашенко, В. Н. Журавлев, М. С. Дубицкая // Научный вестник НГУ: Геотехническая и горная механика, машиностроение / НГУ. – Д., 2013. – № 1. – С. 57-61.

4. Wyckaert, K. Vibro-acoustical modal analysis: Reciprocity model symmetry and model validity // K. Wyckaert, F. Augusztinovicz, P. Sas // Journal of Acoustical Society of America. – 1996. – Issue 100 – P. 3172-3181.

5. Elliott, S. J. Active vibroacoustic control / S. J. Elliott, P. Gardonio // Responsive systems for active vibration control: Advanced Study Institute, held in Brussels, Belgium, from 10-19 September 2001. – London: Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 59-82.

6. Яланский, А. А. Акустический экспресс-контроль состояния породного массива и устойчивости горных выработок / А. А. Яланский, Т. А. Паламарчук, И. Н. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 1998. – Вып. 8. – С. 118-124.

7. Виброакустический контроль динамики системы «углепородный массив - крепь горных выработок» / С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, А. В. Мухин, В. Г. Черватюк // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2002 – Вып. 36. – С. 131-135.

8. Сергієнко, В. М. Можливості та перспективи вдосконалення віброакустичної апаратури з оцінкою тривалості пакета вільних коливань / В. М. Сергієнко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2002 – Вып. 40. – С. 70-77.

9. Паламарчук, Т. А. Теория и практика применения метода виброакустического контроля расслоения массива горных пород при камерно-столбовой отработке гипсовых месторождений / Т. А. Паламарчук, В. Б. Усаченко, В. А. Амелин // Наукові праці ДонНТУ: серія «гірничо-геологічна» / ДонНТУ. – Донецьк, 2009. – Вип. 10 (151). – С. 50-58.

#### REFERENCES

1. Baukov, A. Yu. and Zvonkina, A. A. (2009), "About equivalent parameters of multilayer structures with reference to optimization of vibro-acoustic control method", *Gornyyu informatsionno-analiticheskiy biulleten*, no. 9, pp. 257-263.

2. Pustovoytova, N. A. and Shkuratnik, V. L (2008), "Raising awareness resonant acoustic method of determining the properties of rock massif", *Gornyyu informatsionno-analiticheskiy biulleten*, no. 6, pp. 107-111.

3. Shashenko, A. N., Zhuravlev, V. N. and Dubitskaya, M. S. (2013), "Mathematical Model of the Envelope of Vibroacoustic Sounding of Heterogeneous Rock Massif", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.1, pp. 57-61.

4. Wyckaert, K., Augusztinovicz, F. and Sas, P. (1996), "Vibro-acoustical modal analysis: Reciprocity model symmetry and model validity", *Journal of Acoustical Society of America*, no 100, pp. 3172-3181.

5. Elliott, S. J. and Gardonio, P. (2001), "Responsive systems for active vibration control", *Responsive systems for active vibration control.: Advanced Study Institute, held in Brussels, Belgium, from 10-19 September 2001*, Kluwer Academic Publishers, London, England, pp. 59-62,

6. Yalansky, A. A., Palamarchuk, T. A. and Slashchov, I. N. (1998), "Acoustic express control of the rock massif and the stability of mine workings", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 8, pp. 118-124.

7. Skipochka, S. I., Palamarchuk, T. A., Mukhin, A. V. and Chervatyuk, V. G. (2002), "Vibro-acoustic control system dynamics "coal-breed massif - mine support"", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 36, pp. 131-135.

8. Sergienko, V. M. (2002), "Opportunities and prospects of the improvement of the equipment with the assessment of the duration of packet of free oscillations", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 40, pp. 70-77.

9. Palamarchuk, T. A., Usachenko, V. B. and Amelin V. A. (2009), "The theory and practice of application of a method of vibroacoustic control of stratification of a massif of rocks at room-and-pillar working out gypsum deposits", *Naukovi pratsi DonNTU, seriya girnycho-geologichna*, no 10 (151), pp. 50-58

---

### Об авторах

**Скпочка Сергей Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики горных пород Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net).

**Сергиенко Виктор Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [sergienko.vic@yandex.ua](mailto:sergienko.vic@yandex.ua).

### About the authors

**Skipochka Sergej Ivanovitch**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of Department of Rock Mechanics, The Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net).

**Sergienko Viktor Nikolayevich**, Candydate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [sergienko.vic@yandex.ua](mailto:sergienko.vic@yandex.ua).

---

**Анотація.** Об'єкт досліджень – віброакустичний метод гірничої геофізики, що традиційно використовується для виявлення заколів і розшарувань в приконтурній зоні масиву. Мета роботи – розробка апаратури, яка розширює можливості методу і підвищує оперативність контролю. Інформативні параметри оцінки стану масиву гірських порід, що лежать в основі розробленої апаратури – характеристики згасання його власних коливань. Збудження коливань здійснюють одиночним ударом. До складу апаратури входять ударник, датчик вібрації з кабелем і електронний блок. Результати відображаються на трирозрядному світлодіодному індикаторі. З метою підвищення електромагнітної стійкості датчик вібрації виконано активним. Для зниження енергоспоживання енергоємні вузли автоматично підключаються на короткий час. Конструкція всіх комплектуючих апаратури дозволяє виконувати обстеження у важкодоступних місцях. Експериментальний зразок апаратури пройшов апробацію на двох шахтах.

**Ключові слова:** віброакустичний контроль, масив гірських порід, заколи, розшарування, апаратура.

**Abstract.** Object of study – vibro-acoustic method mining geophysics, traditionally used to identify of fishweirs and breakings in the marginal zone of the array. Objective – development of equipment that expands the capabilities of the method and improves the efficiency control. Informative assessment of the rock massif parameters underlying the developed equipment - vibration characteristics of its own vibrations. Vibrational excitation is carried out by a single impact. The structure of the apparatus includes hammer, vibration sensor with cable and electronic block. Results are displayed on the three-digit LED display. In order to increase the stability of an electromagnetic vibration sensor configured active. To reduce energy consumption energy-nodes automatically connect for a short time. The design of all components of equipment allows you to perform surveys in remote places. Experimental prototype equipment has been tested at two mines.

**Keywords:** vibro-acoustic control, rock massif, fishweir, breaking, apparatus.

*Статья поступила в редакцию 5.07.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук*

УДК 622.451:658.512.007

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,  
**Кокоулин И.Е.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)  
**Жалилов А.Ш.**, инженер  
(ГП «Селидовуголь»)  
**Бокий А.Б.**, аспирант  
(ГВУЗ «ДонНТУ»)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА  
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. співр.,  
**Кокоулін І.Є.**, канд. техн. наук, ст. науч. співр.  
(ІГТМ НАН України)  
**Жалілов А.Ш.**, інженер  
(ДП «Селідоввугілля»)  
**Бокій О.Б.**, аспірант  
(ДВУЗ «ДонНТУ»)

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ШАХТНИХ  
ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ, ЯКІ РЕКОНФІГУРУЮТЬСЯ, З  
ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ**

**Bunko T.V.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kokoulin I.Ye.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)  
**Zhalilov A.Sh.** M.S (Tech.)  
(SE «Selidovugol»)  
**Bokij A.B.**, Doctoral student  
(SHEI «NMU»)

**PERFECTION OF METHOD CALCULATION OF RECONFIGURATED  
MINE VENTILATION SYSTEMS WITH THE USE OF PARALLEL  
CALCULATIONS**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности реконфигурируемых шахтных вентиляционных систем: топологические изменения в пространстве, неравномерность обеспечения объектов проветривания воздухом, существенная неопределенность аэродинамических параметров элементов. Для таких вентиляционных систем, включающих ветви с разностепенными законами движения воздуха, предложено использовать кластерное моделирование и методы узловых невязки. Предложена адаптация этих методов к расчету реконфигурируемых вентиляционных систем, включающих источники и пути эмиссии метана как в рудничную атмосферу, так и на земную поверхность, с применением параллельных вычислений, реализующих расчеты воздухораспределения с разностепенными законами движения воздуха и возможностями задания давлений в разных точках сети.

© Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов, А.Б. Бокий, 2014